

單棟建物之干擾效應對主建物順風向風力之統計特性探討

王嘉國^{1*} 蔡牧蓁² 鄭啟明³ 羅元隆⁴

^{1*} 淡江大學風工程研究中心助理研究員

² 淡江大學土木工程學系研究生

³ 淡江大學土木工程學系教授、風工程研究中心中心主任

⁴ 淡江大學土木工程學系助理教授

摘要

在高樓林立的現代都會區中，高層建築物間存在的干擾效應是相當複雜且亟需解決的風力載重計算問題。國內外已有若干學者針對流場特性、幾何造型、相對位置、來風風向、以及干擾效應造成的局部風壓做出定量的描述。然而由於影響因素甚多，且若存在兩棟以上干擾建物時，則干擾效應的形成將更為複雜且無法單純以線性疊加方式推測。為使干擾效應之研究單純化且易於探討，本研究擬以兩棟相同方柱建在三種地況下，一為可移動的干擾建物，一為固定位置的主要建物，以力平衡儀進行一系列順風向風力量測的風洞實驗。透過計算每一干擾建物的相對位置對主要建物形成的順風向風力統計特性，了解干擾效應存在所造成的非高斯風力載重特性。並以基本統計特性繪製成等高線圖(Contour Plot)以便於討論干擾效應範圍之定義，確定考慮干擾效應之時機。

關鍵字: 干擾效應，力平衡儀，機率密度分布，非高斯

Keywords: Interference Effect, Force Balance Measurement, Probability Density Function, Non-Gaussian

1. 前言

在人口稠密的都會區中，高層建築相互之間的風場干擾效應是一項重要的研究課題。目前國內外的建築物耐風設計規範中，均以不受干擾下單一建築物之形式來進行風力載重的計算，對於該建物可能受到鄰近建物的影響並沒有明確的建議。唯一提及干擾效應的日本 AIJ-2004 規範中，亦僅提供局部且定性的描述而沒有較為明確的整體概念。本研究嘗試以統計分析概念探討三種標準地況下，單棟干擾建物對主要建物的干擾效應範圍之影響。然而干擾效應的影響因子十分複雜，包含主建物與干擾建物的幾何造型、相對位置及流場特性等相關因素。因此本研究進行僅以順風向風力為主，單純皆為方柱的主

建物與干擾建物其大範圍的風洞實驗結果進行討論。

國內外文獻對於干擾效應的探討並不多，盧等[1]發現當主建物與干擾建物相對距離為縱向比(X/B ， X 為兩建物順風向距離， B 為方柱寬度)小於 3 時，上游方柱所產生之渦旋被中、下游的方柱抑制而在柱體間產生一準穩定區域。當縱向比大於 3 時，風力係數會隨干擾建物所在之位置而有顯著差異。橫向比(Y/B ， Y 為兩建物橫風向距離)大約在 2.0~2.25 時，風力係數有最大值產生。此最大值則隨距離比增加而減小。English[2]發現，當縱向比較小時，主要建物受上游干擾建物影響較明顯。此時順風向風力係數為負值，然而隨著縱向比增加，順風向風力係數亦增加。橫風向風力係數值皆偏小。綜合結果得知干擾效應對橫風向風力係數之影響似可忽略。Niemann and Kasperski [3] 探討風向角及結構頻率不同對於兩相同煙囪於固定上下游距離下的干擾效應。該研究指出干擾範圍所造成的極值風力應以較大的結構頻率範圍討論之，並建立基底彎矩在不同時間長短下，對於評估非高斯極值風力的數學模式。Xie et al. [4、5]針對單棟及雙棟干擾建物進行一系列的探討，發現上游干擾建物造成的遮蔽效應會減少主建物的風荷載。隨著干擾建物寬度比增加，干擾係數隨之減少。當干擾建物為兩棟時，造成主要建物的風荷載增加。此外，干擾建物與主要建物的高度比由 50%增加到 125%時，使干擾效應有明顯的變化。對於以上結果，Xie et al. [4、5]建立一多項式擬合公式作為比較。Kim et al. [6]進行建築物的表面風壓實驗，並研究不同高度比的干擾建物對主要建物局部風壓係數的探討。結果顯示，表面極值風壓會隨高度比的增加而增加；另外，當干擾建物位置設在主要建物斜邊時，將使表面極值風壓變化更為顯著。Hui et al. [7]發現影響干擾效應的主因，取決於建築物的外型及風向；另外指出在干擾建物作用下，主要建物角隅處所量到最小表面風壓值遠大於單棟建物 40%。Hui et al. [8、9]進行一系列不同風攻角的實驗，結果表示干擾建物的位置以及來風風向的角度，為影響主要建物風力的最重要兩個因子。當干擾建物坐落於主建物角隅處，其局部風壓更有顯著的變化。Hui et al. [8、9]並利用可視化技巧(Particle Image Velocimetry Technique)說明干擾建物在特定流場及位置作用下，會導致主建物表面極值負風壓增大。

2. 風洞實驗設計與數據處理

2.1 風洞實驗設計

本研究風洞實驗於淡江大學一號風洞實驗室完成。該風洞屬傳統型開放吸入式風洞，試驗段尺寸為長 18.0 m、寬 2.0 m 及高 1.5 m。動力系統採用直流變速 75HP 馬達及驅動軸流式風扇，可執行實驗之風速範圍為 1.0 m/s 至 15.0 m/s。空風洞下的紊流強度可保持 0.5%~1.0%的穩定氣流。本研究利用不同的錐形版以及粗糙元素模擬出分別代表開闊地況、鄉鎮地況及都市地況之大氣邊界層，並藉由縮尺方柱模型進行順風向風力歷時的量測。如圖 1 所示為三種地況的平均風速剖面與紊流強度剖面，地況 A 為都市地況($\alpha = 0.32$)，地況 B 為鄉鎮地況($\alpha = 0.25$)，地況 C 為開闊地況($\alpha = 0.15$)。

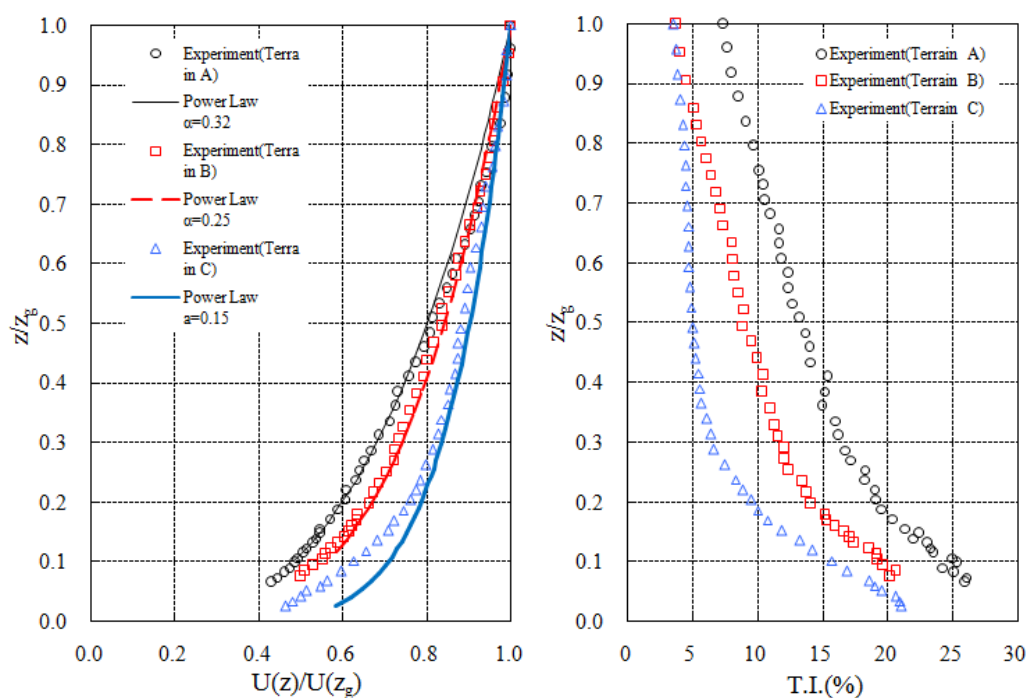


圖 1 無因次化平均風速剖面及紊流強度剖面

2.2 數據處理

為減少干擾效應可能的影響因子，實驗模型以高寬比(H/B)為 6 的兩方柱作為主要建物與干擾建物。於主要建物下方設置力平衡儀量測順風向風力歷時資料，並改變干擾建物位置作為干擾範圍之探討。表 1 則為依相似律原則進行之數據處理方式。

表 1 風洞實驗參數

不受干擾、受干擾系列			
地況	A	B	C
長度尺度比例(風洞:實場)	1:400	1:400	1:400
時間尺度比例(風洞:實場)	1:33	1:36	1:48
速度尺度比例(風洞:實場)	1:12.1	1:11.1	1:8.3
風洞實驗風力量測採樣頻率(Hz)	500	500	500
實場採樣總時間(sec)	3600	3600	3600
實場最大最小值平均時間(sec)	1	1	1
風洞模型高寬比(H/B)	6	6	6
風洞模型高度平均風速(m/s)	7.78	7.99	8.42

順風向風力統計特性之探討以無因次化風力係數為主。由力平衡儀量測所得之順風向風力歷時以模型高風速壓乘以投影面積予以無因次化求得無因次化風力係數歷時資料，而後再進行統計特性比較。本研究量測時間僅以實場尺度單筆 1 小時作為探討，若欲討論極值分布，則應重複多筆資料以符合統計學上標本數的原則。瞬時風力係數計算

則如下式(1)所示：

$$C_F(t) = \frac{F(t)}{\frac{1}{2} \rho_a \bar{U}_H^2 A} \quad (1)$$

其中 $C_F(t)$ 為瞬時風力係數； $F(t)$ 為量測到的瞬時風力，通常為基底剪力或彎矩； ρ_a 為空氣密度； \bar{U}_H 為風洞實驗模型高的平均風速； A 為計算參考風力所需要的投影面積，若計算剪力則為 \sqrt{BDH} ，若計算彎矩則為 $\sqrt{BDH^2}$ 。

探討任何一自然現象的發生機率甚或進行設計值的概算時，紀錄該自然現象而得知的統計特性可由機率密度分布函數決定。由眾多統計文獻可得知，不同自然現象可由各式不同分布型態的機率密度分布函數代表。然而透過了解機率密度分布函數的形狀，可了解其整體特性趨勢。一般來說，可透過估算四個統計參數得知：平均值、標準差、偏態係數、以及峰態係數。其中當偏態係數與峰態係數均為零時，即為一般常用以作為比較的高斯分佈函數。計算偏態係數 γ_1 及峰態係數 γ_2 的公式如下：

$$\gamma_1 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^3 f(x) dx}{\sigma^3} \quad \gamma_2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^4 f(x) dx}{\sigma^4} \quad (2)$$

其中 μ 為平均值， σ 為標準差， $f(x)$ 為機率密度分布函數。本研究中將以實場單筆一小時長度的瞬時順風向風力係數歷時作為母體標本數，計算其 μ 、 σ 、 γ_1 、 γ_2 作為統計特性之探討指標。

3. 實驗結果與討論

3.1 不受干擾下之順風向風力係數統計特性

圖 2 所示為三種地況中，單棟高寬比 6 的方柱在不受到任何干擾影響下的順風向風力係數機率密度分布函數及累積機率分布密度函數。表 2 所列為各項統計數據。由表 2 及圖 2 中可看出，即便在不受干擾的情形下，單棟建物所受之順風向風力的機率密度分布函數亦不為理論上的高斯分布型態(即偏態係數與峰態係數為零)。表 2 及圖 2 僅為單筆一小時記錄所呈現之結果，然而重複數次之後仍可發現其非高斯特性。以地況 A 為例，進行十筆一小時長度之紀錄予以分析，可發現高階統計特性的變異數頗高。偏態係數的變異數為 18.3 % 而峰態係數的變異數高達 170.1 %，指出風洞實驗存在頗明顯的弱定常性。

綜合比較三種地況的平均風力係數與擾動風力係數，可得到與圖 1 中所示之平均風速剖面與紊流強度剖面相同的趨勢。平均值隨著地況指數增加而減少，擾動值則隨著地況指數增加而增加。然而最大值與最小值的趨勢則因非高斯特性的變異性過大而無法由結果看出。

2014 年 10 月 17 日

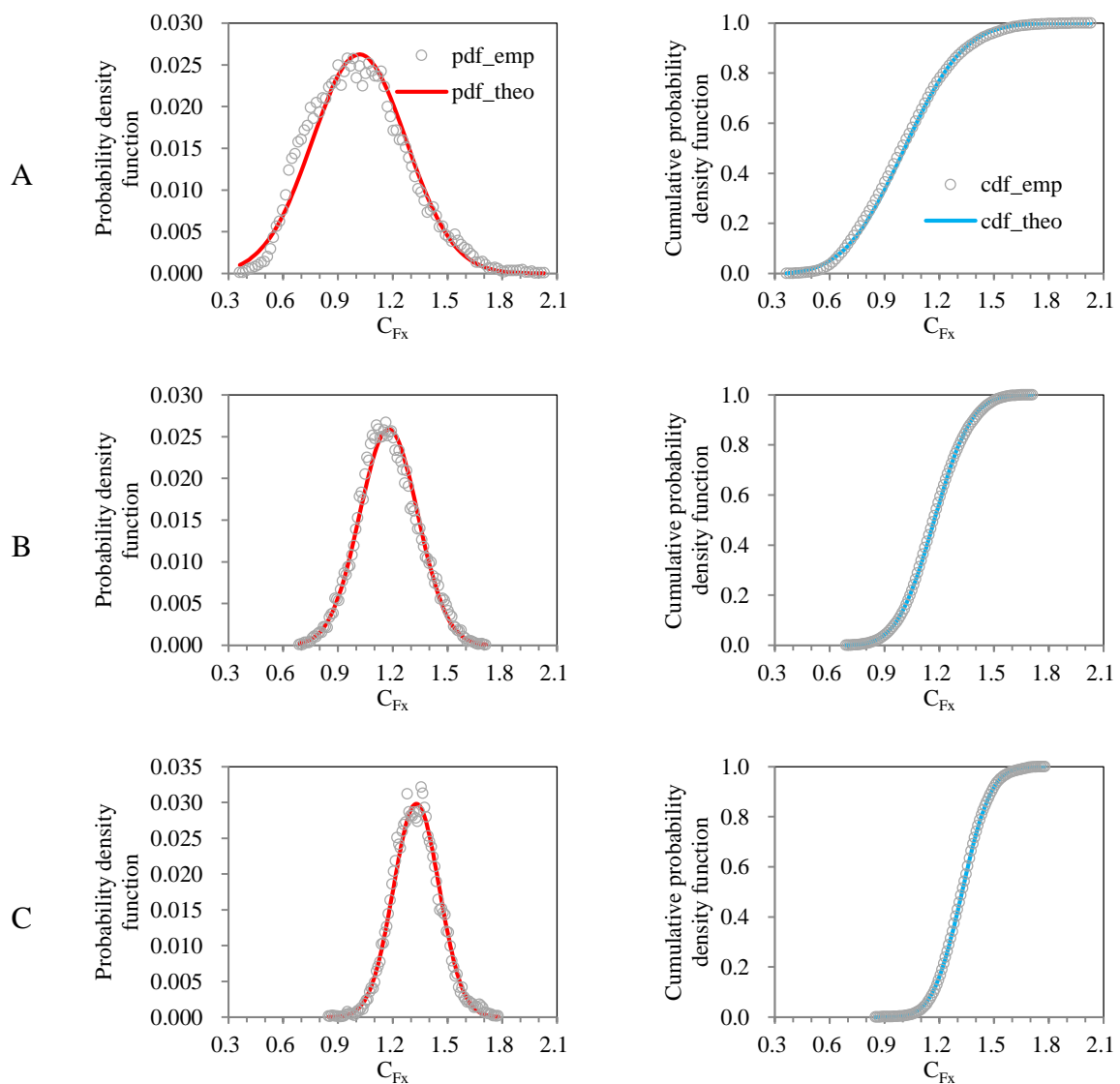


圖 2 機率密度分布與累積機率密度分布函數圖

表 2 單棟方柱不受干擾下之順風向風力係數統計數據

地況	平均值 $\overline{C_{F_x}}$	標準差 C'_{F_x}	偏態係數 $\gamma_{1,C_{F_x}}$	峰態係數 $\gamma_{2,C_{F_x}}$	最大值 $C_{F_x,max}$	最小值 $C_{F_x,min}$
A	1.017	0.257	0.387 (18.3%)	-0.070 (170.1%)	2.038	0.354
B	1.178	0.159	0.124 (48.1%)	-0.176 (62.2%)	1.715	0.683
C	1.329	0.126	0.141 (42.6%)	0.229 (54.4%)	1.782	0.844

(•)為該統計值的變異數

3.2 受干擾下之順風向風力係數統計特性

干擾建物與主要建物的相對位置以及來風方向將對主要建物所受之風力造成一定的影響。本研究以相同方柱但改變干擾建物的位置作為干擾效應範圍之說明。如圖 3 所示為干擾建物與主要建物相對位置示意圖。主建物為固定且以力平衡儀量測基底剪力，改變干擾建物的位置於圖 3 中所示之格點位置，方進行風力之量測。每個格點位置均進行實場尺度單筆一小時長度的紀錄，並以模型高之速度壓做為參考計算其風力係數值。

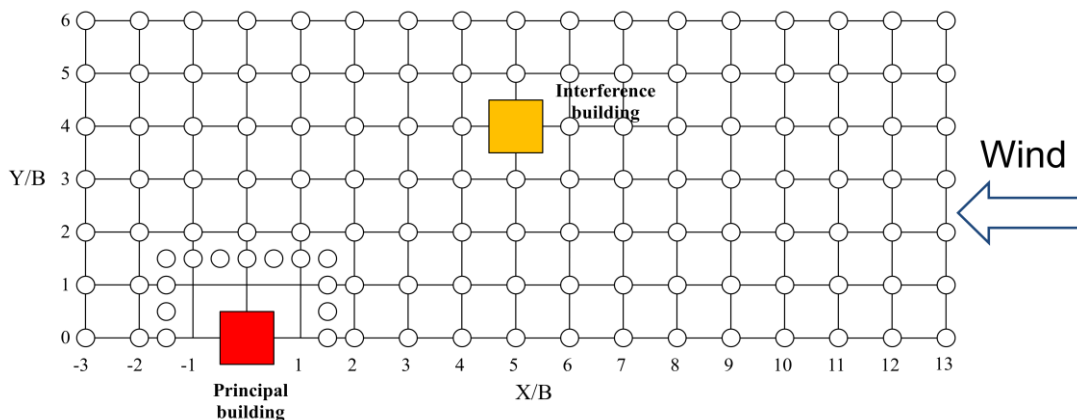
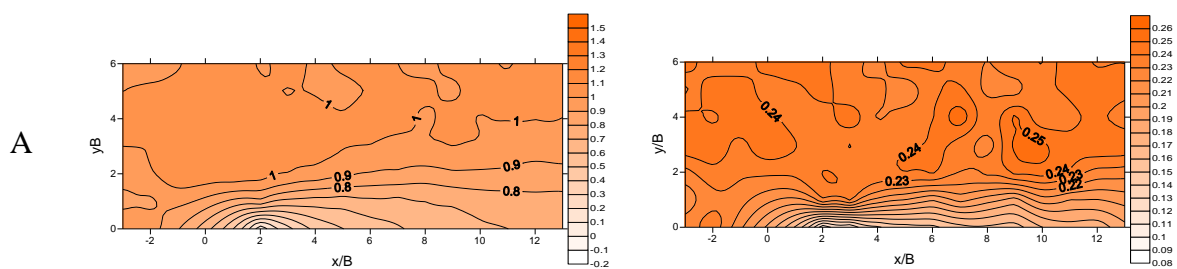


圖 3 干擾建物與主要建物相對位置示意圖

3.2.1 統計特性探討

以格點位置及計算後的順風向平均風力係數及擾動風力係數繪製等高線圖如圖 4 所示。圖 4 顯示出平均風力係數及擾動風力係數受到干擾建物影響下的結果。在平均風力係數部分，A 地況當 y/B 小於 2 時，主建物直接受到上游干擾建物的影響而導致風力係數低於 1.0 (不受干擾之係數為 1.017)；而其他兩地況亦有相同之分布趨勢。若比較受干擾與不受干擾之差異則可歸納出 $y/B = 2.0$ 為一干擾效應範圍的臨界值。而比較 x/B 則可發現 $x/B = 2.0$ 為折減風力係數最大之處，隨著干擾建物往上游移動，折減量逐漸變小。本研究格點位置 x/B 最小值為 1.5，故若以本實驗結果歸納可得知 $x/B = 2.0$ 為最大折減處，折減量往上下游隨著距離而逐漸減少。擾動風力係數受到干擾下之分布頗與平均風力係數的分布類似。然而受到干擾與不受到干擾下的擾動風力係數相比則發現差異性較平均風力係數來得小。



2014 年 10 月 17 日

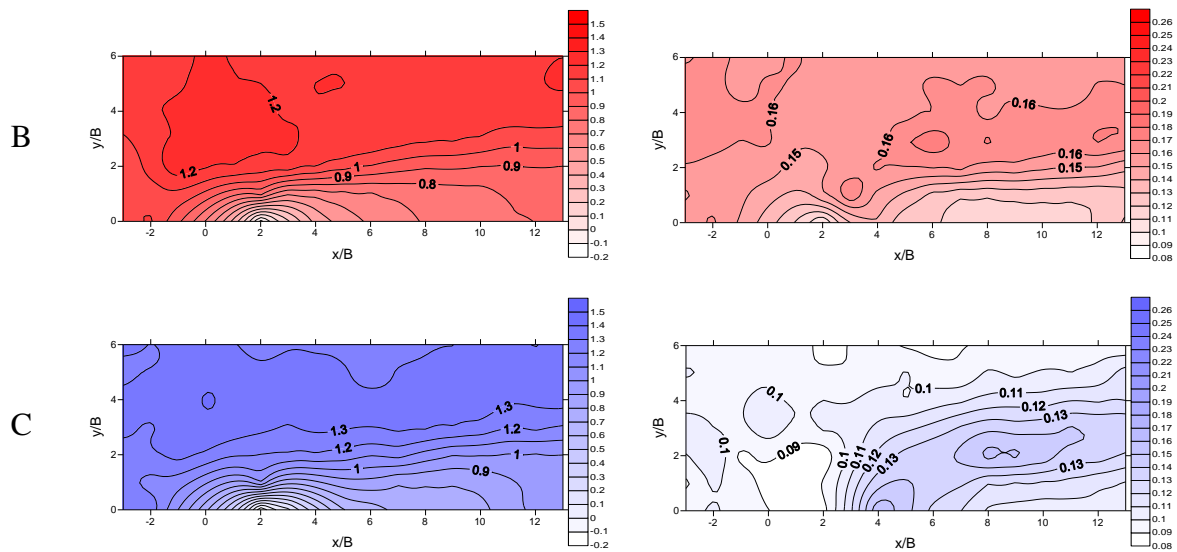
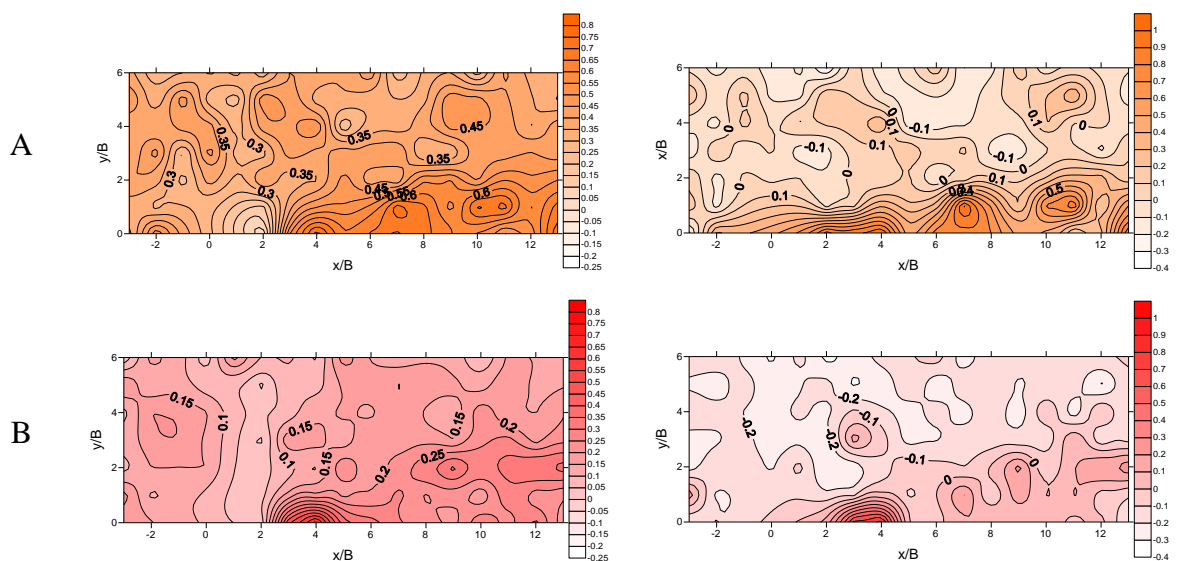


圖 4 平均風力係數(左)及擾動風力係數(右)等高線分布圖

圖 5 顯示則為偏態係數與峰態係數的等高線分布圖。由圖中可發現，地況 A 的偏態係數及峰態係數有較大的上游範圍造成較高的非高斯特性，而地況 B 及地況 C 則較為集中在 $x/B = 2.0 \sim 5.0$ 之間有集中的現象。高偏態係數與高峰態係數的分佈在 y/B 方向上則不超過 $y/B = 2.0$ 的範圍。一般而言，決定非高斯特性取決於偏態係數或峰態係數是否為零，若為零則屬高斯分布。然而工程上為方便計算則僅以高斯特性進行風力計算，故而可能忽略非高斯而造成極值估算上的錯誤。文獻上對於非高斯的界定尚未有一致的共識，故在本系列研究中初期將偏態係數或峰態係數之絕對值 0.5 以內稱為低度非高斯 (mildly non-Gaussian)，以上稱為高度非高斯 (Strongly non-Gaussian)。比較圖 5 中偏態係數分布與峰態係數分布可看出具有高度相似性，此趨勢對於作為非高斯判斷可予以簡化為以偏態係數作為指標即可。



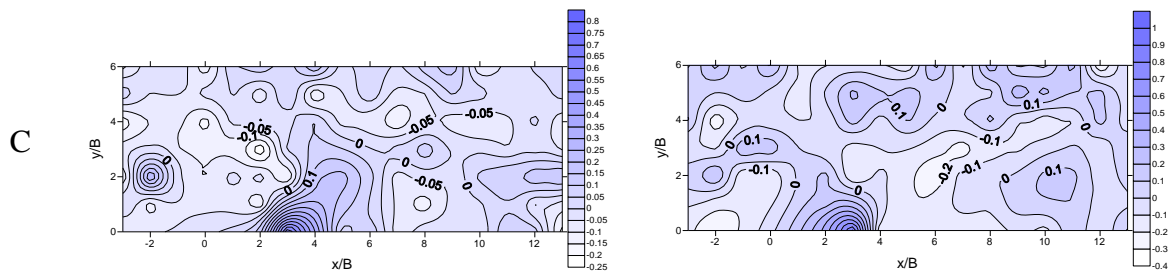


圖 5 偏態係數(左)及峰態風力係數(右)等高線分布圖

一般而言，評估極值風力之發生可取決於三個因素：平均值、標準差以及尖峰因子。然而受到干擾效應影響之順風向極值風力則必須先行評估尖峰因子是否為高斯或非高特性，方能得到合理的設計值。如圖 6 所示為正值尖峰因子與負值尖峰因子的等高線分布圖。對照圖 5 中偏態係數之分布多為正值，亦即若以機率密度分布函數作為判斷，則分布形狀偏左，分布尾巴偏右，容易造成較大的最大值，亦即較大的正值尖峰因子。因此圖 5 中的偏態係數分布可以由圖 6 正值尖峰因子中找到相似的分布。然而若觀察偏態係數分布與負值尖峰因子分布則無法找到相對應的趨勢。

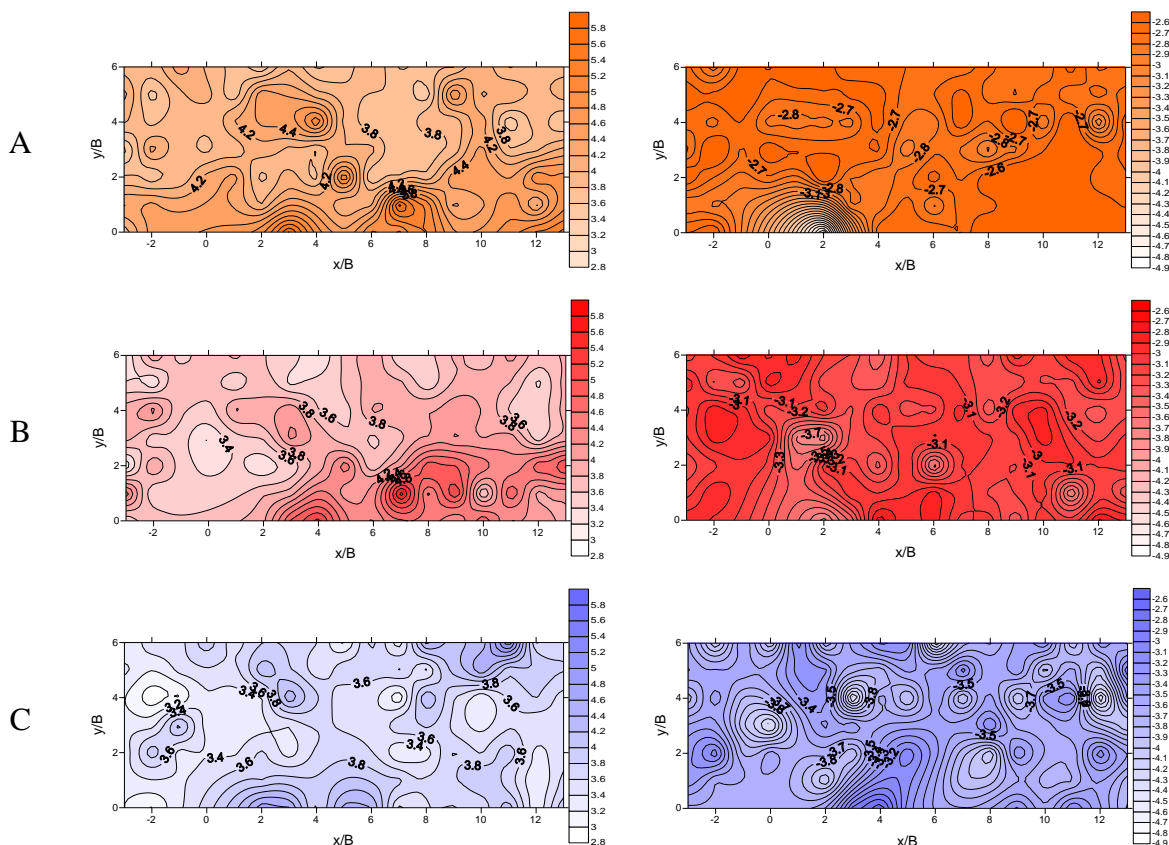


圖 6 正尖峰因子(左)及負尖峰因子(右)等高線分布圖

3.2.2 非高斯特性對於極值風力之影響

本節嘗試以 Kwon and Kareem [10]提出的 Hermite based 轉換法作為模擬非高斯數列

手段，以數值模擬方式比較尖峰因子具備非高斯特性下與高斯特性下的差異。挑選圖 4 及圖 5 中具有高度非高斯特性的位置作為範例說明。以 B 地況 $x/B = 4.0$ 及 $y/B = 0.0$ 為例，由統計分析結果可得知其風力係數平均值為 0.433、標準差為 0.139、偏態係數為 0.678、峰態係數為 0.842。以此四項統計值作為數值模擬依據，利用 Hermite based 轉換法產生 1000 筆一小時長度的非高斯母體標本數，並取各筆之最大最小值繪製成極值分布曲線，重複上述步驟 100 次後取其中位值(median)則可繪製極值分布曲線如圖 6 所示。

由圖 6 中可看出，實線曲線為根據 B 地況 $x/B = 4.0$ 及 $y/B = 0.0$ 位置之平均值為 0.433、標準差為 0.139、偏態係數為 0.678、峰態係數為 0.842 經 Hermite based 轉換法的數值模擬結果。在最大值部分，實驗值為 5.288，對應約在累積百分比 63% 左右，略高於取極值分布的 50% 對應值。由 Cook and Mayne [11] 所建議的 78% 對應值來看，實驗值略顯不保守。然而若比較高斯假設下的尖峰因子造成之最大值，則有很明顯的落差。一般來說，若可判定屬於高度非高斯特性者，可以 78% 作為極值設計的依據較為保守。相反地，由高斯假設下的最小值則為極度保守。由 Cook and Mayne [11] 建議之 22% 作為最小值的預估則頗為相近。然而根據偏態係數及峰態係數均為正值的情形下，最小值的分布應較為集中，以 50% (mean of extremes) 或者 22% 作為設計值的對應累積百分比差異不大。

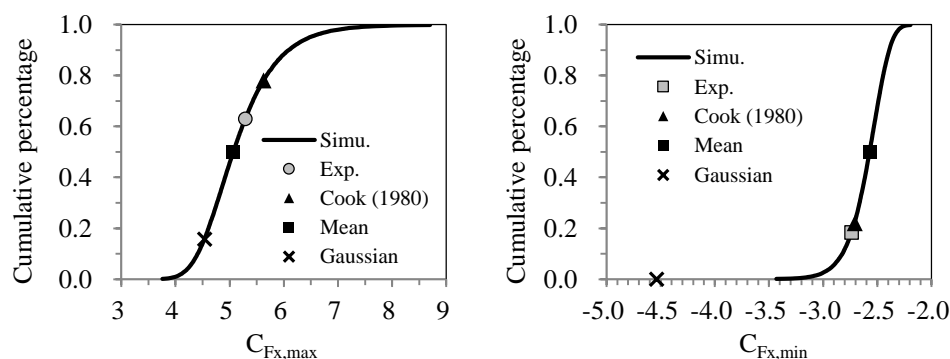


圖 6 實驗最大最小值與模擬極值分布比較圖

4. 結論

本研究首先藉由四項統計指標進行干擾效應範圍的討論。藉由計算三種地況下順風向風力係數歷時的平均值、標準差、偏態係數以及峰態係數，探討在不同地況影響下的平均風力係數與擾動風力係數分布，並指出在某些干擾建物所處的範圍內，會對下游的主建物造成的風力係數增加或折減的情況。此外，本研究亦指出偏態係數分布與峰態係數分布相似，或可以偏態係數絕對值小於 0.5 為低度非高斯、大於 0.5 則為高度非高斯作為工程上的判斷原則。最後則舉例說明非高斯特性對於極值設計風力的影響。由 Hermite based 轉換法為基礎模擬產生的極值分布曲線、高斯假設下之極值、實驗值以及 Cook and Mayne [11] 建議之設計值或取極值之平均各種比較下得知，非高斯特性對於極值風力的影響極為重大，以傳統高斯型態進行設計將會造成極度保守或不保守的預測結果。除此之外，本研究亦指出在傳統風洞實驗內假設為定常性的不確定性可能存在。

5. 參考文獻

- [1] 盧博堅, 鄭啟明, 賴建志, “邊界層中三方柱體群縱向與橫向排列所受風力之交互作用”, *The Chinese Journal of Mechanics*, 1987, 11, 185-193
- [2] E. C. English, “Shielding factors from Wind-Tunnel studies of prismatic structures”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1990, 36, 611-619
- [3] H. J. Niemann, M. Kasperski, “Interference effects for a group of two reinforced concrete chimneys”, *J. Fluids and Struct.*, 1999, 13, 987-997
- [4] Z. N. Xie, M. Gu, “Mean interference effects among tall buildings”, *Engineering Structures*, 2003, 26, 1173-1183
- [5] Z. N. Xie, M. Gu, “Simplified formulas for evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2007, 95, 31-52
- [6] W. Kim, Y. Tamura, A. Yoshida, “Interference effects on local peak pressures between two buildings”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2011, 99, 584-600
- [7] Y. Hui, Y. Tamura, A. Yoshida, “Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2012, 104-106, 98-108
- [8] Y. Hui, A. Yoshida, Y. Tamura, “Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients”, *J. Fluids and Struct.*, 2013, 37, 120-133
- [9] Y. Hui, Y. Tamura, A. Yoshida, H. Kikuchi, “Pressure and flow field investigation of interference effects on external pressures between high-rise buildings”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2013, 115, 150-161
- [10] D. K. Kwon, A. Kareem, “Peak factors for non-Gaussian load effects revisited”, *J. Structure Eng.*, 2011, 137(12), 1611-1619
- [11] N. J. Cook, J. R. Mayne, “A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1980, 6, 125-137